

УДК: 621.6

DOI: 10.53403/9785951505378_2023_281

Установка очистки газовой среды от трития

**О. А. Тивикова, А. А. Юхимчук, И. П. Максимкин,
В. В. Балувев, Е. В. Буряк, Р. К. Мусяев, А. А. Кирдяшкин,
В. М. Першина, А. В. Рыжухина**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

arkad@triton.vniief.ru

При проведении работ с тритием одним из основных является вопрос обеспечения безопасности: существует необходимость очистки рабочей газовой среды (воздуха или инертного газа) от трития и поддержания общего радиационного фона в пределах регламентированной нормы. В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» для этого разработан ряд специализированных установок, основанных на принципе накопления трития и тритиевой воды на специальных сорбентах.

В докладе представлены принципиальная схема установки очистки газовой среды от трития и ее конструкция. Описаны принципы работы отдельных узлов, приведены основные технические характеристики, полученные в ходе испытаний одной из установок.

Введение

В настоящее время в области ядерных и термоядерных исследований все большую актуальность приобретают экспериментальные работы, связанные с использованием трития. При проведении работ с ним требуется соблюдение норм радиационной безопасности: существует необходимость очистки рабочей газовой среды (воздуха или инертного газа) и поддержания общего радиационного фона в пределах регламентированной нормы [1].

В настоящей работе рассмотрены конструкция и принципиальная схема установки очистки газовой среды от трития, разработанной в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»; описаны принципы работы отдельных узлов установки. Приведены основные технические характеристики, полученные в ходе испытаний установки очистки, включенной в состав специализированной инфраструктуры исследовательского комплекса «Фабрика мишеней» экспериментальной установки лазерного термоядерного синтеза [2].

Принцип работы установки очистки газовой среды от трития

Установка очистки газовой среды от трития представляет собой типичную проточную систему с последовательно расположенными в ней функциональными элементами [3]: конвертером, теплообменником, адсорбером и побудителем потока (воздуходувкой). Разработанная установка газоочистки предназначена для поддержания объемной активности (ОА) трития в газовой среде до уровня не более $5 \cdot 10^5$ Бк/м³, по водяному пару – не более 10 ppm. Принципиальная газовакуумная схема установки, представленная на рис. 1, аналогична системе газоочистки установки ТРИТОН [4, 5], разработанной ранее для ЛЯП ОИЯИ (г. Дубна).

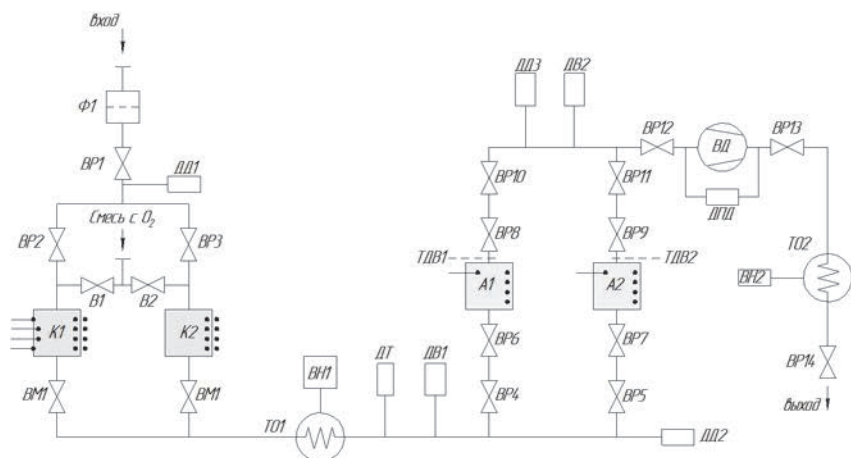


Рис. 1. Принципиальная газовакуумная схема: ВР1, ВР12–ВР14 – вентили ручные с фланцами DN50; ВР2–ВР11 – вентили ручные с фланцами DN40; В1, В2 – вентили ручные с цапговыми соединениями; ВМ1, ВМ2 – вентили цельнометаллические ручные с фланцами DN40; ТО1, ТО2 – воздушные теплообменники; ВН1, ВН2 – вентиляторы для теплообменников; А1, А2 – адсорберы с молекулярным ситом на основе цеолита; ВД – воздуходувка; ДВ1, ДВ2 – датчики влажности газа; ДД1–ДД3 – датчики давления; ДПД – дифференциальный датчик давления; К1, К2 – конвертеры с реагентом/катализатором и нагревателем; ДТ – температурный датчик; ТДВ1, ТДВ2 – тензодатчики веса; Ф1 – газовый фильтр с фланцем DN50

Принцип работы установки рассмотрим на примере очистки рабочей среды бокса. При обнаружении трития в коммуникациях бокса (т. е. при возникновении утечки трития в среду бокса) на систему контроля и управления исследователем поступает сигнал, запускающий циркуляцию среды бокса через блок газоочистки. При этом циркулирующий поток газа проходит через конвертеры К1, К2, заполненные реагентом (или катализатором) при высокой температуре (до 400 °С), на которых происходит процесс окисления трития до формы НТО. Пройдя через конвертеры, газовый поток охлаждается с помощью теплообменника ТО1 и поступает на адсорберы А1, А2, где происходит поглощение влаги, включая НТО, на молекулярном

сите (цеолит). Затем очищенная газовая среда прокачивается воздуходувкой ВД и дополнительно охлаждается с помощью выходного теплообменника ТО2. Циркуляция газового потока продолжается до тех пор, пока ОА трития в газовой среде бокса (или на выходе из газоочистки) не снизится до требуемого безопасного уровня. После очистки газовой среды следует переключить циркуляцию среды бокса в штатный режим, минуя объем газоочистки, а сама установка газоочистки переходит в так называемый байпасный режим (режим «stand-by»).

Газовые коммуникации, соединяющие последовательно один конвертер и один адсорбер через теплообменник, образуют линию очистки. В состав установки входят две линии очистки, соединенные параллельно. Вторая линия (резервная) используется в том случае, когда первая линия недостаточно эффективна или выведена из эксплуатации для проведения технического обслуживания. В случае параллельной работы двух адсорберов скорость очистки увеличивается, однако эффективность использования адсорберов снижается. Поэтому при работе с тритием рекомендуется использовать сначала одну линию, чтобы максимально насытить в адсорбере цеолит влагой с примесью НТО при более высокой ОА трития в потоке газа, а затем использовать вторую линию очистки с более «чистым» адсорбером, чтобы снизить ОА очищаемой газовой среды до требуемого уровня.

Основные технические характеристики и параметры установки приведены в таблице.

Технические характеристики и параметры установки очистки газовой среды от трития

Характеристика, единица измерения	Значение
Газовая среда	Воздух, азот, аргон
Рабочий диапазон давлений газовой среды в коммуникациях, Па (мбар)	От –100 до –5000 (от –1 до –50)
Уровень очистки (ОА) трития при установке новых адсорберов, Бк/м ³ , не более	5·10 ⁵
Масса катализатора в одном конверторе газоочистки, кг	Не менее 12,5
Масса молекулярного сита (цеолита) в одном адсорбере газоочистки, кг	Не менее 15
Количество конвертеров, шт.	2
Количество адсорберов, шт.	2
Диапазон рабочих температур конвертера, °С	250-400
Напряжение питания, В	220
Частота электрической сети, Гц	50
Суммарная мощность нагревателей двух конвертеров, кВт	10
Максимальная мощность воздуходувки, кВт	2,2
Максимальная скорость газового потока, м ³ /ч	120
Габариты блока газоочистки (В×Ш×Г), мм	2155×1200×795
Масса блока газоочистки, кг	1400

Состав установки очистки газовой среды от трития

Внешний вид установки очистки газовой среды от трития представлен на рис. 2. Установка включает в себя следующие основные части:

- два конвертера, заполненные гранулированным реагентом или катализатором;
- два адсорбера, заполненные гранулированным цеолитом (молекулярное сито);
- основной теплообменник;
- побудитель потока (воздуходувка);
- выходной теплообменник;
- автоматизированную систему контроля и управления (АСКУ).

Составные части установки и связывающие их коммуникации размещены на верхнем и нижнем уровнях каркасного металлического шкафа. На верхнем уровне шкафа установлены два конвертера, которые располагаются вертикально и симметрично относительно центра, а также теплообменники, необходимые для охлаждения газовой среды после конвертера и побудителя потока. На нижнем уровне установлены по центру побудитель потока – воздуходувка, размещенная в герметичном кожухе, а по бокам – два адсорбера.

Блок АСКУ установлен в отдельном металлическом корпусе (не показан на рис. 2): регистрирует и контролирует температуру нагревателей конвертеров, давление и влажность газовой среды вдоль линий очистки и состояние побудителя потока (воздуходувки). Настройка значений параметров АСКУ

и дистанционное управление входящим в состав газоочистки оборудованием, как показано в работе [6], осуществляется оператором с помощью мнемосхемы на управляющем компьютере.

Устройства для измерения ОА трития газовой среды (радиометры трития на базе проточных ионизационных камер), не входящие в состав газоочистки, обычно подключаются на выходе установки через байпасные коммуникации. На основании измеренных показаний ОА трития в газовой среде в совокупности с другими показаниями (влажность, давление, температура) АСКУ, интегрированная в исследовательский комплекс, может управлять (автоматически или через оператора) посредством предупреждений, сообщений и блокировок параметрами работы газоочистки.

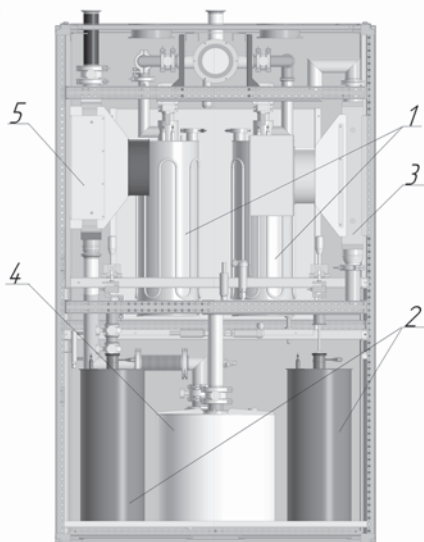


Рис. 2. Основные составные части установки очистки газовой среды от трития: 1 – конвертер; 2 – адсорбер; 3 – теплообменник; 4 – воздуходувка; 5 – выходной теплообменник

Устройство и работа конвертера

Конвертер выполнен из нержавеющей стали и представляет собой герметичный цилиндрический корпус (рис. 3), заполненный гранулами реагента (например, CuO) или катализатора (например, палладиевый АПН (1 % Pd) с размерами гранул от 3 до 5 мм).

Для создания равномерной по объему рабочей температуры в корпусе конвертера размещены два нагревателя мощностью по 2,5 кВт: внутренний нагреватель имеет вид спирали, дополнительный внешний нагреватель припаян к наружной стенке корпуса конвертера. Для контроля и регулировки температуры разогрева в состав конвертера также входят две герметичные металлические трубки-капилляры с установленными в них термодатчиками (капиллярными термомпарами), одна из которых погружена в наполнитель (гранулы реагента/катализатора), а вторая установлена снаружи корпуса конвертера. В зависимости от типа наполнителя (реагент или катализатор) температура разогрева конвертера может изменяться от 250 до 280 °С (для реагента CuO) и от 350 до 400 °С (для палладиевого катализатора). Максимальная температура разогрева конвертера не может превышать 450 °С (срабатывает блокировка от АСКУ).

Вдоль оси конвертера коаксиально размещены его газовые коммуникации (выходные трубопроводы во входных), конструктивно выполненные таким образом, чтобы при наличии потоков газовой среды происходил эффективный теплообмен между стенками трубопроводов. Засыпка реагента/катализатора в виде гранул осуществляется через специальный фланец (DN25), размещенный сверху, который герметизируется заглушкой с алюминиевой прокладкой.

Фланцы, штуцеры и разъемы, включая электроконтакты нагревателей и термопар, выведены на верхний фланец корпуса конвертера, где осуществляется их соединение и стыковка. Остальные стенки и низ корпуса теплоизолируются. Герметизация соединений выходного патрубка, имеющего высокую температуру стенок за счет конвективного переноса тепла в потоке газа, также осуществляется с использованием медной или алюминиевой прокладки.

Газовая смесь, поступающая через входной штуцер конвертера, попадает в центральный трубопровод и сначала проходит вниз, через «лабиринт», огибая систему выходных трубок, играющих роль теплооб-

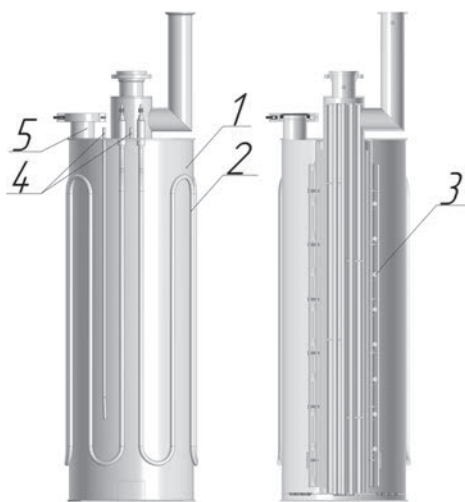


Рис. 3. Основные составные части конвертера: 1 – камера герметичная, 2 – внешний нагреватель, 3 – внутренний спиральный нагреватель, 4 – корпус термопары, 5 – фланец для засыпки наполнителя

менника, а затем по внешнему цилиндрическому объему центрального трубопровода выходит в верхнюю внутреннюю часть конвертера. Далее поток газа поступает вниз через насыпку гранул реагента/катализатора, фильтруется и проходит сквозь перфорированную перегородку в полость на дне корпуса конвертера. Из донной полости поток фильтрованного газа распределяется по системе выходных трубок и поступает в выходной патрубок конвертера.

При недостаточно эффективной конвертации трития в пары воды (НТО), что может быть вызвано малой концентрацией кислорода в газовом потоке при использовании катализатора или восстановлением меди при использовании реагента CuO , на вход конвертера можно подать (например, от баллона) дополнительный поток газа с необходимой примесью кислорода через вентили В1 или В2 (см. рис. 1). В случае применения реагента в качестве наполнителя такой способ на стадии технического обслуживания позволит также регенерировать медь до исходной оксидной формы CuO .

Устройство и работа адсорбера

Адсорбер выполнен из нержавеющей стали и представляет собой герметичный цилиндрический корпус (рис. 4), заполненный молекулярным ситом (используется цеолит типа NaX с размерами гранул до 5 мм). Входной трубопровод соединен на дне камеры со свободной полостью, которая отгорожена от молекулярного сита перфорированной перегородкой.

Адсорбер монтируется в составе газоочистки путем соединения входных и выходных патрубков с трубопроводами линии очистки и подвешивается за петлю на верхнем торце корпуса на рычаг с тензометрическим датчиком веса (ТДВ1 или ТДВ2). Датчик веса позволяет проводить периодические взвешивания устройства с целью определения количества адсорбированной влаги в молекулярном сите.

Газовая смесь, поступающая по входному трубопроводу, попадает в нижнюю полость камеры адсорбера и фильтруется через насыпку гранул цеолита снизу вверх, поступает к выходному патрубку. В ходе фильтрации происходит поверхностная сорбция (адсорбция) паров воды, включая форму НТО, в пористых гранулах цеолита. Сорбционная емкость цеолита по влаге составляет (в зависимости от производителя и типа сорбента) от ~10 до ~20 % от исходной «сухой» массы цеолита. Поэтому очевидно, что для эффективной очистки газовой среды от трития необходимо использовать предварительно осушенный цеолит (желательно на уровне не более 1 ppm по влажности).

Предварительная осушка цеолита (молекулярного сита) в устройстве адсорбера проводится отдельно на специализированных стендах и непосредственно перед монтажом адсорбера в установку газоочистки. В зависимости от условий эксплуатации и технической возможности для восстановления сорбционной емкости молекулярных сит используется несколько вариантов конструкций адсорберов, разработанных в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», которые отличаются вместимостью (объемом для наполнителя) и наличием внутреннего

нагревателя. Так, например, для осушки цеолита в корпусе многофазового адсорбера, показанного на рис. 4, размещен нагреватель, имеющий вид спирали. Контроль и регулирование мощности нагревателя в данном устройстве осуществляется по измерениям температуры на внешней стенке корпуса адсорбера.

Показанное на рис. 4 устройство адсорбера с максимальной массой цеолита до 15 кг может поглотить до 36 Ки адсорбированного трития при уровне ОА газовой среды $\sim 4,5 \cdot 10^5$ Бк/м³ и влажности ~ 1 ppm или до 800 Ки адсорбированного трития при уровне ОА газовой среды $\sim 4,5 \cdot 10^7$ Бк/м³ и влажности до ~ 10 ppm.

Адсорберы, полностью насыщенные тритированной влагой (НТО/ДТО) до допустимого контрольного уровня по объемной активности (ОА) трития в насыщенных парах, должны быть герметично закрыты, отсоединены от коммуникаций газоочистки и переданы для восстановления (осушки) на специализированных стендах в организациях, имеющих лицензии на работы с тритированной водой (в жидкой фазе), или для захоронения в качестве твердотельных радиоактивных отходов.

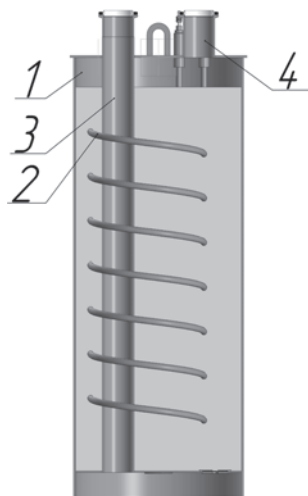


Рис. 4. Основные составные части многофазового адсорбера: 1 – камера герметичная, 2 – нагреватель, 3 – входной трубопровод, 4 – выходной патрубок

Устройство побудителя потока

Побудитель потока (воздуходувка) установлен вертикально в герметичном кожухе (рис. 5), который предотвращает выход циркулирующего газа в окружающую среду и обеспечивает одновременно обдув корпуса воздуходувки при ее работе входным потоком газовой среды, которая поступает через входной фланец крышки кожуха. Выходной патрубком воздуходувки напрямую через трубопровод соединен с выходным фланцем крышки кожуха. Между входным и выходным фланцами кожуха воздуходувки установлен дифференциальный датчик давления, позволяющий по разности давления между входом и выходом определять скорость потока, побуждаемого воздуходувкой.

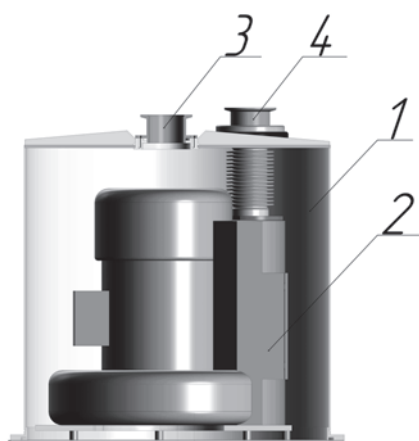


Рис. 5. Основные составные части побудителя потока (воздуходувки): 1 – кожух герметичный, 2 – воздуходувка, 3 – входной фланец, 4 – выходной фланец

Управление работой воздухоудвки (скоростью потока) осуществляется путем изменения частоты (от 10 до 50 Гц) частотного преобразователя в АСКУ через мнемосхему газоочистки на управляющем компьютере. При необходимости для фиксированных частот можно получить калибровочную кривую зависимости скорости потока от давления разрежения на дифференциальном датчике давления.

После открытия всех необходимых вентилей на линии очистки начинается запуск установки газоочистки с включения воздухоудвки на малой начальной мощности (~20 % при 10 Гц на частотном преобразователе) и постепенного увеличения производительности до необходимого уровня, который определяется допустимым давлением разрежения во входных коммуникациях установки (например, при подключении перчаточного бокса к газоочистке давление разрежения в боксе обычно не должно превышать 1,5 кПа).

Обдув корпуса воздухоудвки внутри герметичного корпуса приводит к тому, что выходной поток имеет повышенную температуру газа, поэтому после выходной коммуникации из побудителя потока устанавливается дополнительный теплообменник, охлаждающий поток газовой среды до приемлемого уровня.

Устройство теплообменника

В состав установки очистки газовой среды от трития, показанной на рис. 1, входят два теплообменника: основной теплообменник охлаждает поток газовой среды непосредственно после конвертеров, а дополнительный выходной теплообменник снижает температуру газа на выходе побудителя потока. В зависимости от требований к условиям эксплуатации установки газоочистки в помещениях на радиационно-опасных участках существуют ограничения по использованию водяных систем охлаждения, более эффективных в отношении теплообмена. Поэтому авторами настоящей работы были разработаны варианты систем охлаждения газового потока с теплообменниками как газовой, так и газовойдушной типов.

Использование газовойдушной теплообменника, несмотря на эффективный теплообмен, требует дополнительного подвода к установке газоочистки контуров водоснабжения, а при необходимости и замкнутых водяных контуров, как показано в работе [2], с отдельными подсистемами регулирования потоков воды, водяными насосами и теплообменниками. Использование газовойдушной теплообменника приводит к упрощению конструкции системы охлаждения, но накладывает дополнительное требование к помещению, где располагается установка газоочистки, которое заключается в необходимости наличия системы вентиляции, интенсивность которой достаточна для вывода выделяющегося от установки тепла.

Для примера рассмотрим газоздушный теплообменник, устанавливаемый на выходе воздуходувки, принцип работы которого заключается в следующем: газовая среда, поступающая через входной фланец теплообменника, проходит по внутренним каналам корпуса, который снаружи обдувается потоком воздуха, создаваемого вентилятором, закрепленным на кожухе. Таким образом происходит теплообмен между воздухом и газовой средой и рассеивание тепла. Основные составные части теплообменника показаны на рис. 6.

Для регулирования интенсивности обдува вентилятором через АСКУ при необходимости на выходе теплообменника внутри коммуникации устанавливают температурный датчик, показывающий температуру потока газовой среды.

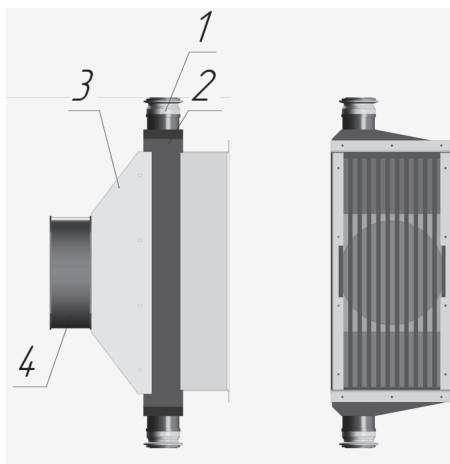


Рис. 6. Основные составные части теплообменника: 1 – входной фланец, 2 – корпус, 3 – кожух, 4 – вентилятор

Автоматизированная система контроля и управления

АСКУ предназначена для регистрации состояния и управления функциональными элементами газоочистки в ручном (по командам оператора) и автоматическом режимах.

АСКУ газоочистки [6] представляет собой распределенную сеть, состоящую из управляющего компьютера, находящегося на удалении от установки, набора модулей (аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000), а также устройств измерения физических параметров установки.

В качестве основного программного средства для создания АСКУ установки используется официально зарегистрированный пакет CRW-DAQ [7], разработанный и применяемый в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Пакет обеспечивает работу с модулями аналогового и цифрового ввода/вывода серии I-7000, позволяет обрабатывать и отображать измеряемые данные в текстовой и графической форме в режиме реального времени, а также строить и применять пользовательский интерфейс для управления программой в удобной для оператора форме в виде мнемосхем.

Программное обеспечение АСКУ обеспечивает:

- непрерывный дистанционный мониторинг основных физических параметров установки (давления, температуры, влажности, состояния нагревателей и т. д.);
- отображение результатов измерений на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхемы и графиков;
- управление узлами (нагреватели, воздуходувка и т. п.) газоочистки по командам оператора;

– оповещение персонала об изменениях, происходящих в работе газоочистки (например, срабатывание блокировок), путем подачи звуковых сигналов и речевых сообщений;

– непрерывное сохранение данных измерений в файлах на жестком диске управляющего компьютера.

Для отображения состояний основных параметров газоочистки используется графический интерфейс, основанный на активной графической мнемосхеме и окнах настройки. [6]. Графический интерфейс обеспечивает пользователю удобство управления газоочисткой. Измеряемые параметры (температура, давление и др.), а также состояние контролируемых элементов отображаются на мнемосхеме. Управление элементами газоочистки производится нажатием курсора на активные области (сенсоры) мнемосхемы.

Результаты испытаний

Работоспособность описанной выше установки очистки газовой среды от трития была подтверждена в ходе специальных испытаний. Испытания проводились в процессе очистки смеси азота с тритием, накопленного в ресивере вместимостью 1 м^3 и показали снижение ОА газовой среды с $5 \cdot 10^8$ до $1 \cdot 10^6$ Бк/ м^3 за час работы. Последующая продолжительная работа газоочистки в течение 2 ч снижает ОА рабочей газовой смеси до уровня менее $4 \cdot 10^5$ Бк/ м^3 .

На рис. 7 приведены результаты измерений ОА потока газа двумя различными приборами одновременно: отечественным радиометром УДГБ и канадским радиометром TUNE. Из рисунка видно, как снижается объемная активность газовой среды в течение часа.

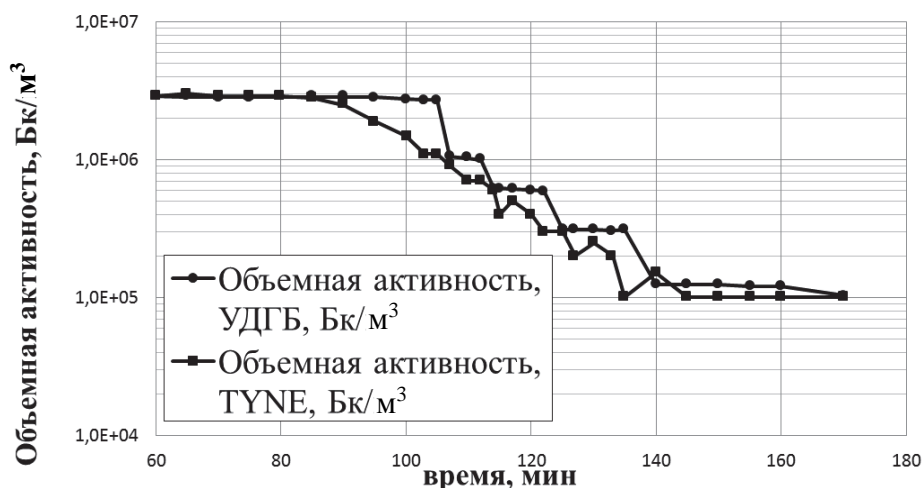


Рис. 7. Результаты измерений ОА газовой смеси двумя различными радиометрами на выходе из газоочистки в ходе процесса очистки ресивера от трития

Заключение

Разработанная в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» установка газоочистки предназначена для эффективной очистки от трития и тритийсодержащих примесей газовой среды перчаточных боксов, ресиверов и газовых коммуникаций различных экспериментальных установок и их инфраструктуры. Технические характеристики газоочистки позволяют при организации замкнутого контура коммуникаций осуществлять интенсивную циклическую очистку рабочей газовой среды от влаги (до 10 ppm) и трития (снижение объемной активности до уровня менее $5 \cdot 10^5$ Бк/м³) при высоких потоках путем конвертации трития до водной формы НТО на гранулах реагента/катализатора и последующей адсорбции влаги на молекулярном сите на основе цеолита.

Созданная для экспериментального комплекса установка очистки газовой среды от трития показала свою работоспособность, при этом технические характеристики установки, полученные после испытаний, продемонстрировали соответствие установленным требованиям.

Список литературы

1. ОСПОРБ 99/2010. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности.
2. Мусяев Р. К. и др. Тритиевая инфраструктура для установки лазерного термоядерного синтеза // Сб. докл. 7-й Международ. конф. и 14-й Международ. школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова IHISM'21 Junior. – Гатчина, 2021. С. 207.
3. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Юхимчук А. А. и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 1999. № 6. С. 17–23.
5. Виноградов Ю. И. и др. Автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза // ПТЭ. 2004. № 3. С. 29–41.
6. Гурин Н. Е., Тумкин А. Д., Вихлянцев О. П., Фильчагин С. В., Курякин А. В., Мусяев Р. К., Буряк Е. В. Автоматизация установки очистки газовой среды перчаточных боксов и газовых коммуникаций от тритийсодержащих примесей // Сб. докл. 13-й Международ. школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова IHISM'19 Junior. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2019. С. 213.
7. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. Вып. 2. С. 80–90.